

基于塔台仿真系统的飞行短期冲突检测

龚宏伟^{1,2}, 周欣^{1,2}

(1. 四川大学视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室, 四川成都 610064;
2. 四川大学计算机学院, 四川成都 610064)

摘要:考虑到雷达数据的误差以及气流等随机因素影响,将卡尔曼滤波引入飞行器短期冲突检测中,以实现更精确的预报。已知研究表明飞行航迹误差服从零均值高斯分布模型。卡尔曼滤波能有效地应对该误差分布模型,滤波结果更接近实际飞行情况,并对未知状态进行有效预测。按照民航飞行安全要求,文中对飞行水平方向和垂直方向的冲突进行预测。通过理论分析和仿真模拟试验,对比传统方法,文中提供的方法不但能对真实存在冲突做出准确预报,还能对潜在的冲突以概率的形式提供参考信息。

关键词:空中交通管制;短期冲突;卡尔曼滤波;仿真;冲突概率

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2013)04-0151-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2013.04.037

Flight Short-term Collision Detection Based on Control Tower Simulation System

GONG Hong-wei^{1,2}, ZHOU Xin^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
2. College of Computer, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Considering error of radar data as well as the influence of airflow and other factors, introduce Kalman filter into the flight short-term collision detection, to get more accurate forecast. The known research shows that flight track error obeys to zero mean Gaussian model. Kalman filter can effectively deal with the error distribution model. Filtering results are closer to the actual conditions, and make a valid prediction of the unknown state. According to the civil aviation flight safety requirements, in this paper, forecast the flight conflict in horizontal and vertical direction. Through theoretical analysis and simulation experiments show that the method can not only forecast the real collision, but also provide the reference information as probability for potential collision.

Key words: air traffic control; short-term collision; Kalman filter; simulation; collision probability

0 引言

随着航空业的发展,空中交通管制越来越重要。为保证同一管制空域内的飞行安全,飞行器之间的冲突检测是必要的手段。现行的冲突检测有中期冲突检测和短期冲突检测。中期冲突检测的目的是检测20分钟内管制区大多数潜在的冲突飞机对^[1],对于部分漏检和某些临时偏离航道的飞机,由短期冲突检测系统解决。在实际飞行中飞机的实时状态信息由雷达获取,然而现阶段的雷达设备或多或少存在一定误差,这使得飞机的实际飞行位置无法准确确定^[2,3]。传统的

方法是根据雷达测量值对飞机的未知状态作直线外推,这显然没有考虑到随机因素的影响^[4,5]。文中采用的卡尔曼滤波基于随机模拟的思想,不仅能对飞机实时位置给出更准确的定位,还能由当前状态对飞机的未知状态做出比较可靠的估算。最终结合飞行安全的要求以概率的形式给出冲突预报。

1 问题描述及分析

1.1 民航安全飞行间隔

为保障在同一管制空域的飞机安全飞行,民航规定了各飞机飞行时的安全间隔距离。部分要求如表1所示^[6]。

从表1数据可以看出,空中交通管制主要针对水平 and 纵向。文中选取这两个方向做讨论,设水平安全间隔为 D' ,垂直安全间隔为 D^{\perp} ,只有当实际飞行时的

收稿日期:2012-07-17;修回日期:2012-10-23

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2009CB320803)

作者简介:龚宏伟(1986-),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为图像处理与模式识别;周欣,博士,副教授,研究方向为图像处理与模式识别。

水平距离和垂直距离分别小于 D' 和 D^\perp ，才会存在冲突。

表 1 民航飞行间隔标准

目视飞行	程序管制/ADS 间隔	雷达管制	雷达监控
250km/h(含)以上纵向间隔为 5km	同速度纵向间隔 10min	区域管制不小于 10km	区域管制纵向间隔 75km
250km/h 以下纵向间隔 2km	前机速度比后机快 40km/h 以上纵向间隔 3min, 快 80km/h 以上纵向间隔 5min	进近管制不小于 6km	进近管制纵向间隔 30km
侧向间隔 500m	同向交叉飞行穿越间隔 15min, 有导航设备定位的间隔 10min		

1.2 飞机实时信息分析

飞行误差是随机分布的,但可以由数据统计分析得出一定的误差模型。文献[7,8]通过对大量实际飞行数据的统计,从勒贝格中心极限定理等概率角度进行分析,得出飞行航迹误差服从零均值高斯分布的经典结论。在他们提出的误差概率模型中将误差分解成沿着航行方向和垂直方向两个独立部分,且都服从零均值高斯分布。Prandini 对两个方向上的误差作了进一步的修正,沿航向方向的方差随着时间 t 二次增长,垂直于航向方向的方差随航程二次增长直到一个饱和值,文中采用修正后的方差模型^[9],概率模型如图 1 所示。

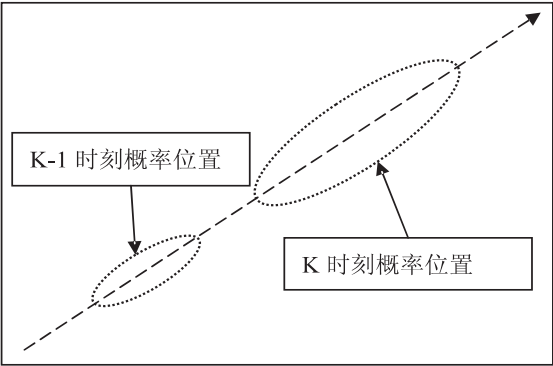


图 1 误差概率模型

1.3 飞机运动的数学表示

分析可得飞机在 $k - 1$ 时刻和 k 时刻的位置有如下位置关系：

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{v} \cdot \Delta t + \mathbf{v}_{k-1} \tag{1}$$

对于雷达数据可以看作是实际位置和测量误差之和：

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \tag{2}$$

其中 \mathbf{x}_k 是飞机在 k 时刻的三维空间位置, \mathbf{v} 是飞行速度, Δt 是探测周期, \mathbf{v}_k 是飞行中的随机影响, \mathbf{z}_k 是雷达获取的位置, \mathbf{w}_k 是雷达的探测误差。以上两个方程就是飞行过程中的动态方程和观测方程。对于满足上面的条件(线性随机微分系统,过程和测量都是高斯白噪声),卡尔曼滤波器是最优的信息处理器。

2 算法描述

2.1 经典 Kalman 滤波理论

设一个动态过程的状态 \mathbf{x}_k 和它的观测值 \mathbf{z}_k 满足以下方程：

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= \Phi_{k-1} \cdot \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_k + \mathbf{v}_{k-1} \\ \mathbf{z}_k &= \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \end{aligned}$$

其中 $\mathbf{x}_k \in \mathbf{R}^n$, 观测 $\mathbf{z}_k \in \mathbf{R}^m$, $\Phi, \mathbf{H}, \mathbf{B}$ 为常阵, \mathbf{u}_k 为确定性控制量。 $\mathbf{v}_k, \mathbf{w}_k$ 均为值为零、方差为 $\mathbf{R}\mathbf{v}_k, \mathbf{R}\mathbf{w}_k$ 的不相关白噪声。且都与初始状态不相关。以下是 Kalman 滤波^[10]方程组：

系统预测值: $\mathbf{x}_{(k|k-1)} = \Phi_{k-1} \cdot \mathbf{x}_{(k-1|k-1)} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{u}_k$

预测误差方差: $\mathbf{P}_{(k|k-1)} = \Phi_{k-1} \cdot \mathbf{P}_{(k-1|k-1)} \cdot \Phi_{k-1}^T + \mathbf{R}\mathbf{v}_{k-1}$

卡尔曼增益: $\mathbf{K}\mathbf{g}_k = \mathbf{P}_{(k|k-1)} \cdot \mathbf{H}_k^T / (\mathbf{H}_k \cdot \mathbf{P}_{(k|k-1)} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}\mathbf{w}_k)$

最优滤波值: $\mathbf{x}_{(k|k)} = \mathbf{x}_{(k|k-1)} + \mathbf{K}\mathbf{g}_k \cdot (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \cdot \mathbf{x}_{(k|k-1)})$

滤波误差方差: $\mathbf{P}_{(k|k)} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{g}_k \cdot \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{(k|k-1)}$

其中 $\mathbf{x}_{(k|k-1)}$ 是 k 时刻的预报值, $\mathbf{x}_{(k|k)}$ 是滤波值, 即最优解, $\mathbf{P}_{(k|k-1)}$ 和 $\mathbf{P}_{(k|k)}$ 分别是预报和滤波值的误差方差阵。在上面给出的初值下,递推状态估计是无偏的。

2.2 冲突概率分析

在已知两架飞机的初始位置 $\mathbf{x}_{0(A)}, \mathbf{x}_{0(B)}$ 和速度 $\mathbf{v}_A, \mathbf{v}_B$, 用 Kalman 滤波方程组可以分别得到飞机 A、B 飞行轨迹的 Kalman 估计 $(\mathbf{x}_A(k), \mathbf{x}_B(k))$ 及估计误差方差阵 $(\mathbf{R}_A(k), \mathbf{R}_B(k))$ 。由 Kalman 滤波的无偏性及正态随机变量的性质知道飞机 A 的可能位置 $\mathbf{x}_k(A) \sim N(\mathbf{x}_A(k), \mathbf{R}_A(k))$ 。同理, $\mathbf{x}_k(B) \sim N(\mathbf{x}_B(k), \mathbf{R}_B(k))$ 。那么在时刻 k , A、B 之间的距离 d_k 作为随机变量也服从正态分布,均值、方差分别为 $\mathbf{x}_A(k) - \mathbf{x}_B(k)$, $\mathbf{R}_A(k) + \mathbf{R}_B(k)$, 即 $d_k \sim N(\mathbf{x}_A(k) - \mathbf{x}_B(k), \mathbf{R}_A(k) + \mathbf{R}_B(k))$ ^[3]。

按照民航安全飞行间隔,将误差分为水平和垂直方向,以 $f(x')$ 和 $f(x^\perp)$ 分别记 d_k 在水平投影和垂直方向的概率密度函数^[11]。则水平冲突概率和垂直冲突概率分别为：

$$Pc'(k) = P(dx' < D') = \int_{x' \in c'} f(x') dx'$$

$$Pc^\perp(k) = P(dx^\perp < D^\perp) = \int_{x^\perp \in c^\perp} f(x^\perp) dx^\perp$$

其中 D' 和 D^\perp 分别为水平安全间隔和垂直安全间隔, c' 和 c^\perp 分别为水平冲突区域和垂直冲突区域。冲突区域为两机小于安全距离的区域。

2.3 算法流程

检测算法流程图如图 2 所示：

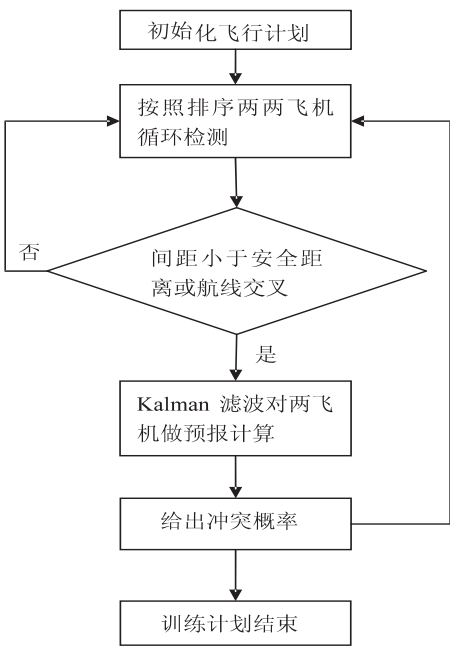


图2 检测流程图

首先对计划内飞机两两进行初比较,如果小于安全距离或者航线交叉才进行详细的滤波处理,如果不满足条件继续比较下一对飞机,直到停止训练计划。

3 模拟试验结果及分析

本实验是基于新一代塔台管制模拟训练系统。该系统由数据库服务器,仿真服务器,三维视景服务器及客户端,视景投影拼接融合服务器,教员、管制员和机长等席位组成。本系统已经交付国内各大空管局使用。

文中的短期飞行冲突检测,是仿真服务器里面的一个功能模块。实验中做如下设置:水平和垂直方向的影响方差都为0.5km,并以0.005km/s的速度增加,雷达测量水平误差为0.04km,垂直误差为0.01km,水平安全距离为5km,垂直安全距离为600m。A、B以720km/h匀速飞行,初始时刻A在B水平面下1.6km,并以3m/s爬升。取水平和垂直方向冲突概率都大于0.75作为预报下限。图3是模拟分析图,图4是雷达界面截图,表2是实验结果数据分析。

图4中S720表示当前速度是720km/h,A92表示高度9200米,H表示当前飞行方向。

表2选取了从60秒时刻到110秒时刻的预报数

表2 预报数据比较

时刻(秒)	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
$Pe^{\prime}(k)$	0.468	0.674	0.844	0.995	0.997	0.997	0.997	0.978	0.795	0.567	0.359
$Pe^{\perp}(k)$	0.549	0.767	0.907	0.967	0.984	0.984	0.998	0.967	0.896	0.645	0.461
			>0.75	>0.75	>0.75	>0.75	>0.75	>0.75	>0.75		
传统方法			冲突	冲突	冲突	冲突	冲突	冲突	冲突		

据。在60秒,65秒的时候文中的方法给出了概率预报,而传统方法没有预报。可以看出,现有预报方法认为有冲突,文中的方法能以概率的形式有效地预报,在现有方法不能预报的时候,文中的方法能给出冲突的概率,从而比传统方法在时间上提前,有利于尽早地发现并避免冲突。

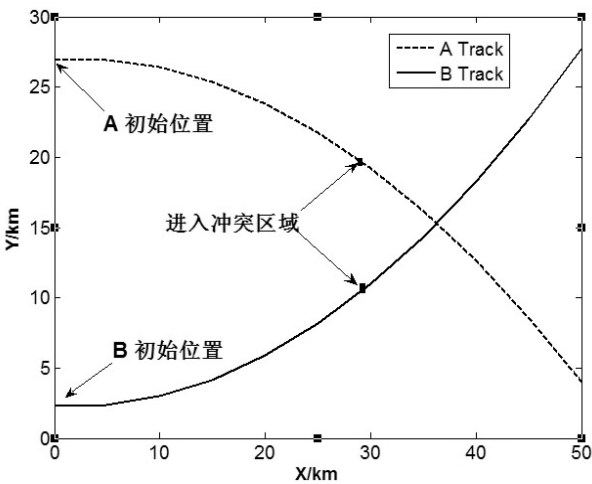


图3 冲突检测模拟

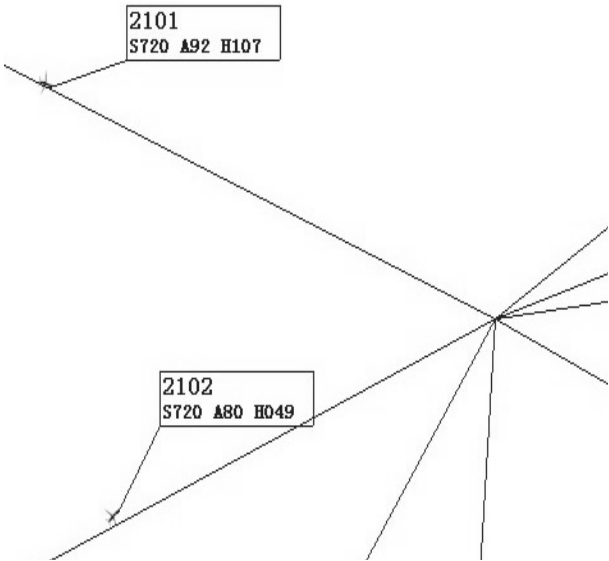


图4 仿真模拟实验图

4 结束语

采用 Kalman 滤波进一步精确了飞机的位置信息,并根据当前状态对未知状态作出可信用度更高的推算。采用概率的方式预报,比传统方法提供更多的信息,特

表 6 第 5 步值约简后的决策表

U	a_1	a_2	a_3	d
t_1	3	*	*	1
t_2	*	*	2	2
t_3	*	3	*	2
t_5	2	2	2	1
t_8	*	*	1	3

知识从某些知识来源中提炼出来,并表示成计算机能接受和使用的方式。在专家系统中,提供准确的推理知识是进行决策规划的关键。知识获取是构造专家系统的“瓶颈”问题,专家知识的好坏直接影响整个系统的性能。

粗糙集理论作为一种处理不完备、不精确及不确定数据的有效方法,在知识获取领域发挥了重要作用并具有广泛的应用前景。

文中开展基于粗糙集的属性值约简算法研究具有重要的理论意义和现实意义,但仍然存在很多问题,比如对动态数据支持不够、处理效率与数据量成反比以及得到的规则冗余度较高等问题,这些问题需要要进一步深入研究。

参考文献:

[1] 裴小兵. 粗糙集的知识约简研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.

[2] 吴守领, 杨颖, 杨磊, 等. 基于粗糙集的决策表属性约简方法的研究[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(1): 32-35.

[3] Guan X, Yi X, He Y. Knowledge reduction and its applications based on rough set[J]. Journal of Intelligence, 2009, 23(3): 464-467.

(上接第 153 页)

别是传统方法不能预报的时候。由于滤波对飞机位置的更准确定位和预测,能应用于进一步缩小安全距离的飞行情况,对飞行流量的增加和自由飞行的开放有很大帮助。

参考文献:

[1] 李俊菊, 宋万忠, 梁海军, 等. 中期冲突探测算法的研究与设计[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(20): 4492-4493.

[2] 罗世谦, 冯子亮. 一种高效的中期冲突探测随机化算法[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(3): 56-57.

[3] Jiang Bin, Chowdhury F. Fault estimation and accommodation for linear MIMO discrete-time systems[J]. IEEE Trans. on Control Systems Technology, 2005, 13(3): 493-499.

[4] 魏光兴, 杨昌其. 飞行冲突检测与调配的方法研究[J]. 中国民航学院学报, 2005, 23(6): 1-4.

[5] 吴舜歆, 彭炜, 李瑞芳. 飞行计划冲突探测算法研究[J].

[4] 张春燕. 基于粗糙集理论的属性值约简算法研究[J]. 计算机与现代化, 2008, 24(7): 79-81.

[5] 张文修, 吴伟志, 梁吉业, 等. 粗糙集理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[6] 郑梦泽. 基于粗糙集理论的交通控制知识获取与决策研究[D]. 上海: 复旦大学, 2008.

[7] 张晓艳. 基于粗糙集的旋转机械故障诊断知识获取方法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2009.

[8] 代广珍, 徐超. 基于 RS 理论的快速属性约简求核方法[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(4): 133-135.

[9] 刘宝康, 杜玉娥. 基于“3S”的甘肃省苜蓿病害诊断专家系统的知识获取与表示[J]. 草业科学, 2008, 25(11): 88-93.

[10] 任永昌. 软件成本估算及其专家系统研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2008.

[11] Ren Y C, Xing T, Zhu P. An attributes reduction algorithms of expert system knowledge acquisition[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 48(6): 187-191.

[12] 汪凌, 胡培. 基于粗糙集的决策系统知识获取算法及实证分析[J]. 情报杂志, 2009, 28(3): 144-147.

[13] Dai Jianhua, Li Yuanxiang, Liu Qun. A hybrid genetic algorithm for reduct of attributes in decision system based on rough set theory[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2002, 7(3): 285-289.

[14] Zhou J, Miao D Q, Pedrycz W, et al. Analysis of alternative objective functions for attribute reduction in complete decision tables[J]. Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2010, 15(8): 1601-1616.

[15] 常晓艳. 粗糙集知识约简算法研究与应用[D]. 北京: 北京化工大学, 2005.

计算机工程与设计, 2007, 27(3): 430-432.

[6] 国务院中央军委空中交通管制委员会. 飞行间隔规定[M]. 北京: 中国民航出版社, 2007.

[7] Paielli R A, Erzberger H. Conflict probability estimation for free flight[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(3): 588-596.

[8] Erzberger H, Paielli R A, Douglas R, et al. Conflict detection and resolution in the presence of prediction error[C]//Proc. of the 1st USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar. [s.l.]: [s.n.], 1997.

[9] Prandini M, Watkins O J. Probabilistic aircraft conflict detection[R]. [s.l.]: [s.n.], 2005.

[10] 梅永兵, 朱允民. 基于 Kalman 滤波的飞行冲突探测[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2005, 42(3): 451-452.

[11] 高扬, 徐浩军, 郑海峰. 计算航路上飞行冲突概率的一种方法[J]. 飞行力学, 2009, 27(2): 50-53.